

## 광명역 고속철도 역사를 활용한 1.5MW급 태양광발전시스템 설계 연구

### A Study on Design of 1.5MW Photovoltaic Power Generation System using Gwangmyeong Railway Station Building

유복종 · 박찬배\* · 이 주

Bok-Jong Yoo · Chan-Bae Park\* · Ju Lee

**Abstract** In the 21st yearly session of the Conference of the Parties (COP 21) of the 2015 United Nations Climate Change Conference, held in Paris, France, in December 2015, the “Paris Agreement” was negotiated; this is a new global agreement on the reduction of climate change, which encourages every country to participate in countermeasures for global climate change. Along with such movements, the electric railway sector has also been actively engaged in low carbon technology. This paper studied the building of a 1.5MW photovoltaic power generation system using the rooftop of the Gwangmyeong Station Building, which is the largest roof among the high-speed railway station buildings in Korea; this station has passenger traffic that reached about 7 million in 2014. For this study, we configured an optimized photovoltaic (PV) power generation system and then estimated the expected annual energy production by using PV system software; we also calculated the expected revenue that could be obtained by linking this source to the power distribution system. The obtained data were used to analyze the contribution of low-carbon energy that could be obtained by introducing a PV power generation system on the roof of an electric railway station building.

**Keywords** : Photovoltaic (PV), Photovoltaic power generation, PVsyst, Low carbon energy, PV system for station buildings

**초 록** 프랑스 파리에서 2015년 12월 개최된 제21차 기후변화협약 당사국총회(COP21)는 신기후체제 합의문인 “파리 협정”을 채택하였다. 이는 2020년 만료 예정인 교토의정서를 대체하는 것으로 모든 국가가 전지구적인 기후변화 대응에 참여하는 것으로 국제사회는 공동의 장기 목표로 산업화 이전 대비 지구 평균 기온 상승을 2°C 보다 상당히 낮은 수준으로 유지하고 온도 상승을 1.5°C 이하로 제한하기 위한 노력을 추구하여야 하며, 모든 국가는 장기 저탄소 개발 전략을 마련하여 2020년까지 제출하는 것을 요청하고 있다. 철도교통분야에서는 저탄소화에 대한 연구를 활발히 지속적으로 진행하고 있다. 본 논문에서는 국내 고속철도 역사 중 최대 건축규모이며 2014년 기준 여객수송인원 약 7백만명을 담당하는 광명역 역사 지붕을 활용한 1.5MW급 태양광 발전시스템을 설계를 위한 연구를 다룬다. 이를 위해 최적의 태양광발전시스템 설비를 구성한 후 PVsyst소프트웨어를 활용하여 연간 예상 발전량을 산출하고 배전계통 연계시에 예상 수익을 산출하여 철도역사의 태양광발전시스템 도입에 따른 저탄소 에너지화에 대한 기여도를 분석하고자 한다.

**주요어** : 태양광, 태양광발전, PVsyst, 저탄소 에너지, 역사 태양광

## 1. 서 론

파리협정의 체결로 현재 철도교통분야에서도 신기후체제의 대응과 저탄소에너지화에 대한 보다 많은 연구가 필요한 시점이다. 본 논문에서는 국내 고속철도 역사 중 최대 건축규모인 광명역사의 지붕을 활용한 태양광발전시스템의 설계에 대한 연구로 철도역사의 태양광발전시스템 도입으로 인한 신기후체제의 대응과 저탄소 에너지화에 기여하고 연간 발전량 예측을 통한 도입 시의 수익적인 장점도 함께 알아보하고자 한다. 이를 위해 광명역사의 위치 정보를 토대로 태양광 모듈이 설치 가능한 면적을 계산하여 태양광 모듈, 인버터를 선정하고 태양광 어레이의 최적 설계 후 예상 연간 발전량을 산출하고 한전 계통연계시에 예상 수익율을 추정한다. 철도역사를 활용한 해외의 대표적 태양광발전 설비 구축 사례로는 미국 Coney Island의 Stillwell Avenue역에 총 2,800개의 박막형 태양발전 모듈을 설치하여 연간 25만kWh의 전력을 생산하고 있다. 독일은 19층 높이의 Freiburg

\*Corresponding author. Tel.: +82-70-8855-1646, E-mail: cbpark@ut.ac.kr.

© 2016 The Korean Society for Railway. All rights reserved.

<http://dx.doi.org/10.7782/JKSR.2016.19.5.592>

Central역사의 남측 정면에 240개의 태양전지 모듈이 설치한 경우와 베를린 중앙역 Lehrter Bahnhof 지붕에 780개의 태양전지를 설치하여 총 발전량 180kW로 연간 274MWh의 전력을 생산하여 역사 사용 전기의 15%까지 충당하고 있다. 일본의 경우는 JR East 다카사키역 승강장 지붕에 총 200kWp 용량의 태양광 모듈을 설치하여 연간 약 25만kWp의 전력을 생산하고 있으며 중국은 고속철도 홍차오역 철도역사 지붕에 23,910개의 태양전지 모듈을 설치하여 연간 6,300MWh의 전력을 생산하여 인근 배전망에 계통연계하고 있다.[1] 국내 태양광발전 설비의 구축 실적으로는 2009년 8월 한국철도공사 본사 사옥에 90.4kW 설치를 시작으로 2014년 기준 총 용량 522.12kW를 설치하였으나 전력 다소비형 건물 유형에 비해 태양광 설치 실적은 다소 미진한 수준이다[2].

## 2. 본 론

### 2.1 고속철도 광명역사 개요

고속철도 광명역사는 2004년에 건립된 국내 고속철도 역사 중 최대 건축 규모이다. 위도 37°24'57.01"N, 경도 126°53'05.39"E에 위치하며 방위각 23°이며 고도는 약 12m이다. 건축물 외관은 Fig. 1과 같으며 건축면적은 Table 1과 같이 48,184m<sup>2</sup>로 이중 태양광 모듈이 배치 가능한 지붕 면적은 콘코스를 제외한 면적 33,264m<sup>2</sup>이다. 광명역의 전기 수전설비는 22.9kV 특고압 수전으로 계약용량은 6,000kVA이며 계약종별은 산업용(갑)고A(II)이다[2].

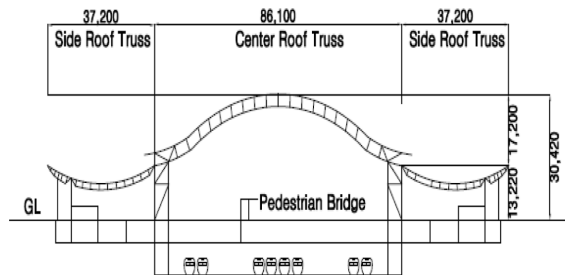


Fig. 1. Section view.

Table 1. Overview of construction.

Classification	KPX Gwang-Myeong Station
Latitude/Longitude	37°24'57.01"N / 126°53'05.39"E
Land area	264,131.00m <sup>2</sup>
Building area	48,184.00m <sup>2</sup>
Architectural area	78,495.26m <sup>2</sup>
Size	2 basement floors, 4 ground floors
Structure	Steel frame
Station building	W143.5m×L297m
Concourse	W31.5 m×L297m

### 2.2 태양광발전시스템 설계

#### 2.2.1 태양광발전시스템 설계 순서

고속철도 광명역사 지붕을 활용한 태양광발전시스템은 Fig. 2와 같은 순서로 설계된다[3]. 광명역사의 위치 정보를 이용하여 태양광 발전량이 최대인 태양광 어레이의 최적 경사각을 선정하고, 태양광 어레이간의 이격거리를 설계하며 태양광 모듈과 인버터 선정 후 연결된 모듈의 수가 선정된 인버터의 동작범위내인지 확인한 후 광명역사 지붕을 활용한 배치 가능한 최종 모듈 수량을 결정하게 된다.

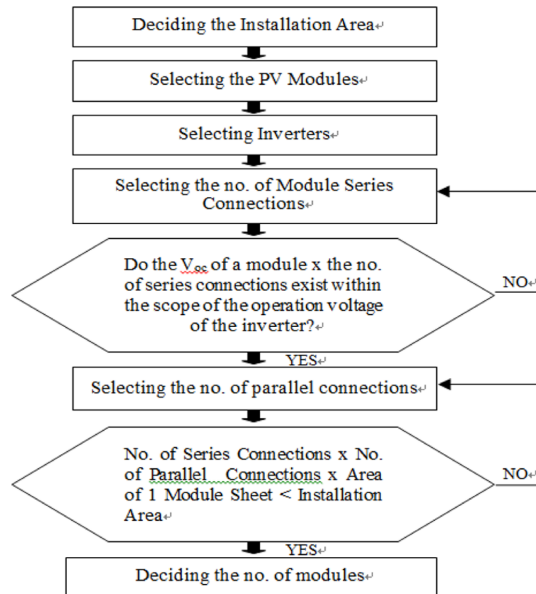


Fig. 2. Flow of designing photovoltaic power generation system.

2.2.2 태양광 어레이 최적 경사각 선정

고속철도 광명역사 지붕을 활용한 태양광발전시스템의 설계를 위해 위치 정보인 위도 및 경도와 건물 방위각 23°임을 고려하여 PVsyst의 Meteonorm 7.1 데이터를 활용한 연간 발전량이 최대인 태양광 어레이의 최적 경사각을 선정하면 Fig. 3과 같이 30°로 선정된다.

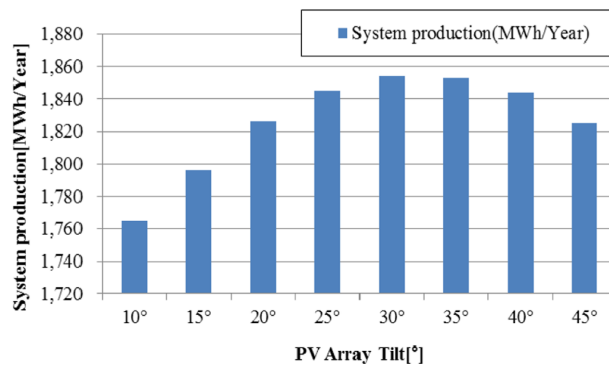


Fig. 3. Selection of optimal angle of photovoltaic array.

2.2.3 태양전지 모듈의 선정/어레이 이격거리 도출

태양광 모듈 용량 300W로 하여 제조사별 성능을 비교하면 Table 2와 같으며, 셀 형식이 N 타입으로 LID(Light Induced Degradation)가 적고, 셀 개수가 60Cell로 모듈 1장당의 설치 면적이 적게 소요되며 모듈 효율이 18.3%으로 H사 보다 우수한 L사 제품을 선정한다.

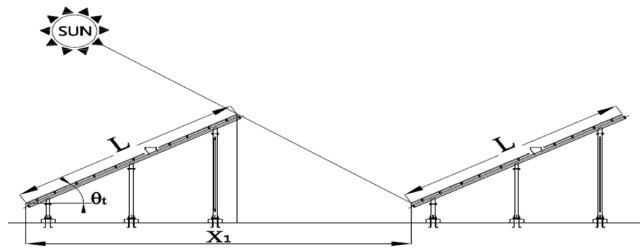
음영을 고려한 태양광 어레이간의 이격거리는 식 (1)과 같이 어레이의 경사각과 위도 및 지구 자전축을 고려하여야 한다.[3] 태양광 어레이간의 이격거리는 Fig. 4와 같이 2m로 설계하였다.

$$X_1 = L \{ \cos(\theta_f) + \sin(\theta_f) \times \tan(lat + 23.5^\circ) \} \tag{1}$$

여기서,  $X_1$ 은 어레이간 최소 이격거리[m],  $L$ 은 어레이의 길이[m],  $\theta_f$ 는 어레이 경사각[°],  $lat$ 는 설치지역의 위도[°]이다.

**Table 2.** Comparison of performance of photovoltaic modules.

		Company 'L'	Company 'H'
Maximum power( $P_{max}$ )		300W	300W
Cell type		N type	P type
Open circuit voltage( $V_{oc}$ )		39.8	44.8
Short circuit current( $I_{sc}$ )		9.98	8.70
Voltage at maximum power( $V_{mpp}$ )		32	36.6
Current at maximum power( $I_{mpp}$ )		9.4	8.20
Module efficiency(%)		18.3	15.3
Mechanical features	Dimensions(mm)	1640L×1000W×35D	1972L×992W×40D
	No. of cells	6×10	6×12
Temperature coefficients	Maximum power( $P_{mpp}$ )	-0.41%/°C	-0.41%/°C
	Open voltage( $V_{oc}$ )	-0.29%/°C	-0.31%/°C
	Short current( $I_{sc}$ )	+0.04%/°C	+0.055%/°C
Maximum system voltage(V)		1000(IEC),600(UL)	1000(IEC),600(UL)



**Fig. 4.** Separation distance of photovoltaic arrays.

#### 2.2.4 태양광 인버터의 선정

태양광 인버터는 500kW급으로 하여 제조사별 성능을 비교하면 Table 3과 같다. S사는 DC 정격입력 전력에서 K사의 600kW 보다 낮은 560kW의 입력 전력으로 AC 550kVA의 높은 정격 출력을 내고 최대출력점(Maximum Power Point)의 전압 범위가 넓어 안정적인 발전이 가능하며 최대효율 98.6%의 높은 변환 효율로 많은 발전량을 얻을 것으로 기대되는 S사 제품을 선정하였다. S사의 태양광 인버터 AC 정격 출력 550kVA 3대를 적용하여 전체 태양광발전시스템을 구성하면 Fig. 5와 같다.

**Table 3.** Comparison of performance of photovoltaic inverters.

		Company 'S'	Company 'K'
DC input	Maximum DC power	560kW	600kW
	Maximum input voltage	1,000V	1,000V
	MPP voltage range	436~850V	550~830V
	Regular input voltage	449V	550~1000V
	Maximum input current	1,250A	1,091A
AC output	Rated power	550kVA	500kW
	Rated AC voltage	270V	370V
	Rated frequency	50Hz/60Hz	50Hz/60Hz
	Rated current	1,176A	781A
	Total harmonic distortion [THD]	3%	3%
Maximum/Euro efficiency		98.6%/98.4%	98.42%/98.14%

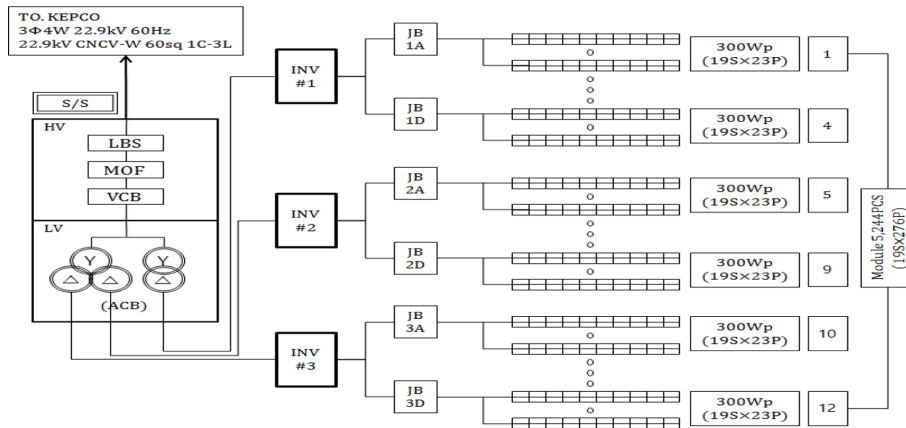


Fig. 5. PV system diagram.

### 2.2.5 모듈 직병렬수 설계

인버터의 입력 전압의 크기는 스트링으로 직렬 연결된 각 모듈 전압의 총합으로 전압은 온도에 따라 달라지는 특성으로 인버터의 입력전압의 크기를 산정할 때에는 동절기와 하절기 동작의 극한의 온도 상태가 사용된다[4].

#### (1) 스트링 구성 모듈의 최대 개수

동절기 저온에서는 모듈의 전압이 증가하므로 인버터가 손상되지 않는 인버터 최대 DC입력 전압은  $-10^{\circ}\text{C}$ 의 개방전압 이하이어야 한다. 직렬 연결 가능한 모듈의 최대 수는 식(2)와 같다.

$$N_{\max} = \frac{V_{\max(INV)}}{V_{OC(Module-10^{\circ}\text{C})}} \quad (2)$$

여기서,  $N_{\max}$ 는 모듈의 최대 수,  $V_{\max(INV)}$ 는 인버터의 최대전압,  $V_{OC(Module-10^{\circ}\text{C})}$ 는 표준시험조건하(STC)  $-10^{\circ}\text{C}$ 에서의 모듈 개방전압이다. 전압변화량( $\Delta V$ )를 이용 표준시험조건(STC)에서의 개방전압  $V_{OC(STC)}$ 로부터  $-10^{\circ}\text{C}$ 에서의 모듈의 개방전압  $V_{OC(Module-10^{\circ}\text{C})}$ 는 식(3)과 같다.

$$V_{OC(Module-10^{\circ}\text{C})} = (1 - 35^{\circ}\text{C} \times \Delta V / 100) \times V_{OC(STC)} \quad (3)$$

#### (2) 스트링 구성 모듈의 최소 개수

하절기 고온에서는 모듈의 표면온도는 약  $70^{\circ}\text{C}$ 까지 쉽게 상승하며 인버터의 최소 MPP 전압 이하일 경우 인버터가 정지하게 된다. 직렬 연결 가능한 모듈의 최소 수는 식(4)와 같다.

$$N_{\min} = \frac{V_{MPP(INV)}}{V_{OC(Module-70^{\circ}\text{C})}} \quad (4)$$

여기서,  $N_{\min}$ 는 모듈의 최소 수,  $V_{MPP(INV)}$ 는 인버터의 MPP 최대전압,  $V_{OC(Module70^{\circ}\text{C})}$ 는  $70^{\circ}\text{C}$ 에서의 모듈 개방전압이다.  $70^{\circ}\text{C}$ 에서의 모듈 개방전압  $V_{OC(Module70^{\circ}\text{C})}$ 는  $^{\circ}\text{C}$ 당 %로 나타나는 전압변화량( $\Delta V$ )에 대한 값을 사용하여 STC 조건 하에서의 MPP 전압  $V_{MPP(STC)}$ 로부터 계산되며 식(5)와 같다.

$$V_{OC(Module70^{\circ}\text{C})} = (1 + 45^{\circ}\text{C} \times \Delta V / 100) \times V_{MPP(STC)} \quad (5)$$

#### (3) 스트링 수 결정

최대 태양광 어레이 전류가 최대 인버터 입력전류를 초과하지 않는지 확인한다. 스트링의 최대 수는 인버터 최대 허용 DC입력 전류와 최대 스트링 전류의 비로 계산되며 식(6)과 같다.

$$N_{String} = \frac{I_{\max(INV)}}{I_{N(String)}} \quad (6)$$

여기서,  $N_{String}$ 은 스트링 최대 수,  $I_{\max(INV)}$ 는 인버터의 최대 허용 DC 입력전류,  $I_{N(String)}$ 는 최대 스트링 전류이다.

(4) 최종 직병렬수 결정

식 (2)~(6)를 적용하여 인버터 AC 정격 출력 500kVA 1대당 연결 가능한 모듈 직렬수는 19직렬, 병렬수는 92병렬로 설계하였다.

2.2.6 전력 케이블의 굵기 계산

어레이 간선 및 DC간선, AC케이블의 굵기 계산은 Table 4와 같으며  $K_w$  계수는 구리값을 적용하여 계산한다.

Table 4. Calculation of thickness of power cable.

Type	Voltage dip	Cable cross-section area	$K_w$ Value	
			Cu	Al
2-Cable DC	$e = K_w \frac{L \times I}{1,000} \times A$	$A = K_w \frac{L \times I}{1,000} \times e$	35.6	58.4
2-Cable single-phase				
3-Cable 3-phase			30.8	50.5
3-Cable DC				
3-Cable single-phase	17.8	29.2		
3-Cable 3-phase				

여기서,  $e$ 는 전압강하[V],  $K_w$ 는 도체의 계수,  $L$ 은 도체의 거리[m],  $I$ 는 도체에 흐르는 전류[A],  $A$ 는 도체의 단면적[mm<sup>2</sup>]이다. 태양광 어레이에서 접속반까지의 String 간선은 전압강하 2% 이내로 최대 가능 길이 219m를 고려하여 Solar-Cable 6mm<sup>2</sup>를 적용하며 접속반에서 태양광 인버터까지의 DC간선은 전압강하 2%이하로 최대 가능 거리 546m를 고려하여 F-CV 케이블 최대 300mm<sup>2</sup>를 적용한다. AC간선은 인버터와 ACB 저압반간의 거리를 고려하여 F-CV 케이블 240mm<sup>2</sup> 굵기의 6회선을 적용한다.

2.3 PVsyst를 활용한 예상 발전량 계산

고속철도 광명역사의 지붕을 활용하여 어레이 고정 경사각 30°로 태양광 발전량 예측 상용 프로그램인 PVsyst를 이용한 월별 발전량은 Fig. 6에서 보는 바와 같다. 여기서, GlobHor는 수평면 일사량(Horizontal global irradiation)이며 E\_Grid는 발전 손실이 고려된 계통연계점에 주입되는 발전량(Energy injected into grid)이다. PVsyst 시뮬레이션 결과는 Table 5에서 보는 바와 같이 최대 연간 발전량은 1,852MWh로 일 평균 3.22시간 발전함을 알 수 있다.

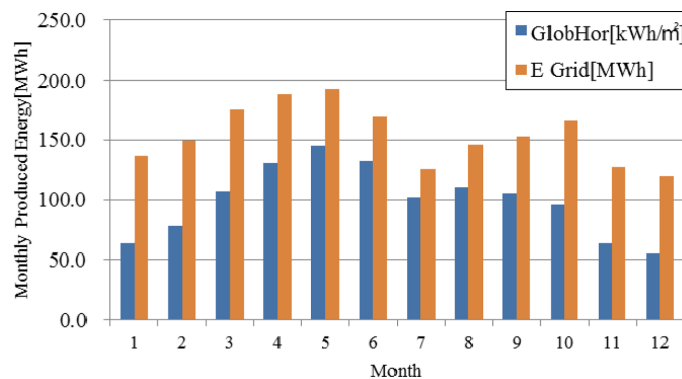


Fig. 6. Monthly energy production graph.

**Table 5.** PVsyst simulation results.

	Results	Misc.
Latitude/Longitude	37°24'59.48"N/126°53'05.24"E	
Azimuth	23°	
Module capacity	1,573[kWp]	DC
Installation type	Roof Type	
Array tilt	Fixed 30°	
Module	300Wp (5,244pcs)	
Inverter	550kVA(3pcs)	
Year produced energy	1,852MWh	
Performance ratio	89.1%	
Dayily produce hour	3.22kWh/kWp/day	

**2.4 한전 배전계통 연계 시 예상 수익 도출**

고속철도 광명역사 지붕에 태양광 모듈 300Wp 5,244장을 배치하여 1.5MW급의 태양광발전시스템을 구축한다면 2016년 6월 말을 기준으로 예상 투입 개략공사비는 31.35억원으로 Table 6과 같으며, 한전 22.9kV 특고압 배전계통에 연계시에는 Table 7에서 보는 바와 같이 약 3.61억원의 연수익이 발생할 것으로 예측된다. 이를 투자비 대비 회수 가능 년수를 계산하면 8.68년으로 예상된다. 반대로, 광명역 구내 수전 계통에 연계 시에는 연 전기 사용량 34,164MWh(일일 전기사용 20시간, 수용률 78% 가정) 대비 약 5.4%의 전력 에너지 소비 절감이 가능할 것으로 저탄소 에너지화에 크게 기여할 것으로 예측된다[5,6].

**Table 6.** Estimation of approximate construction expenses.

	Materials	Properties	Q'ty	Price(KRW1,000)
Equipment	Module	300Wp	5,244	1,570,000
	Inverter	550kVA	3	225,000
	Structure	Roof type	1	276,500
	Electrical		1	201,450
Installation	Electrical	Included Cable	1	193,550
	Structure	Installation	1	118,500
	Interconnection		1	300,000
	Others		1	250,000
Gross sum				3,135,000

**Table 7.** Annual expected revenue.

Classification	Predicted yearly power generation volume [MWh]	Weight	Average price (KRW)	Revenue (KRW1,000)	Misc.
Renewable energy certificate (MWh)	1,852	1.5	86,477	240,233	Weigh for building usage; Average price for first half of 2016
System marginal price(kWh)	1,852		65.46	121,231	Average price for first half of 2016
Gross sum				361,464	

**3. 결 론**

고속철도 광명역사 지붕을 활용하여 300W의 태양광 모듈 5,244장을 배치하여 AC 정격 출력 550kVA의 태양광 인버터 3대를 설치한다면 1.5MW급의 태양광발전시스템 구축이 가능한 것으로 설계되었다. 예상 연간 발전량은 1,852MWh로 1일당 3.22

시간 발전함을 알 수 있으며 이를 한전 22.9kV 배전계통에 연계시에는 년 3.6억원 정도의 수익 발생이 예상된다. 태양광발전시스템으로부터 생산된 전기를 광명역사 내부의 소비 전기로 사용할 경우에는 년 약 5.4%의 전기 에너지 소비절감이 가능하다. 본 연구에서와 같이 철도역사 지붕을 활용하거나 승강장 상부, 폐선로 부지 등 철도시설의 유휴 공간을 활용한 태양광발전시스템을 확대 적용한다면 파리협정 체결로 인한 신기후체제 속에서 철도교통분야에서도 저탄소 에너지화에 대한 보다 많은 역할을 할 것으로 충분히 기대된다. 철도교통분야에서는 기후변화 대응책의 여러 활동 중 철도 인프라시설의 친환경에너지 적용 기술 개발을 진행하고 있다. 앞으로 본 연구에서 다룬 것처럼 태양광 등 신재생에너지를 발전원으로 하여 철도시설 유휴 공간을 활용한 확대 기술 적용 연구로 저탄소 에너지화에 대한 기여함이 필요하며 향후 신재생에너지원으로 발전하고 남은 잉여 전력을 저장 활용하는 에너지 저장 기술에 대한 보다 활발한 연구가 지속적으로 수행되어야 한다.

## References

- [1] Korea Railroad Research Institute (2015) Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement under the Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Final report on planning of countering climate changes in the rail transport sector.
- [2] Korean Railroad Corporation (2015) Electrical operations data, KORAIL Report 22.
- [3] S.M. Cheong, J.S. Lee (2014) *Design of Photovoltaic Power Generation System*, Eduall, 83, Moraena-ro, Mapo-gu, Seoul, Korea, pp. 106-123.
- [4] H.H. Lee (2009) *Photovoltaic Power Generation for Low Carbon Green Growth*, Kidari Publishing Corp., Seoul, pp. 212-216.
- [5] [www.knrec.or.kr/knrec/13/KNREC130110.asp?id=2382&page=2&num=1157&Search=&SearchString=](http://www.knrec.or.kr/knrec/13/KNREC130110.asp?id=2382&page=2&num=1157&Search=&SearchString=) (Accessed 01 June 2016)
- [6] [www.kpx.or.kr/www/contents.do?key=225](http://www.kpx.or.kr/www/contents.do?key=225) (Accessed 01 June 2016)

(Received 27 July 2016; Revised 14 September 2016; Accepted 7 October 2016)

---

**Bok-Jong Yoo:** ybjong@gmail.com

Department of Electrical Engineering, Hanyang University, 222 Wangsimni-ro, Seongdong-Gu, Seoul 04763, Korea

**Chan-Bae Park:** cbpark@ut.ac.kr

Department of Railroad Operation System Engineering, Korea National University of Transportation, Cheoldobangmulgwan-ro, Uiwang-si, Gyeonggi-do 16106, Korea

**Ju Lee:** julee@hanyang.ac.kr

Department of Electrical Engineering, Hanyang University, 222 Wangsimni-ro, Seongdong-Gu, Seoul 04763, Korea